

УДК 539.3

*Е.А. ЛУНЕВ, Е.Н. БАРЧАН, И.В. АРТЕМОВ, А.В. НАБОКОВ, Я.Н. ЛИСОВОЛ,  
А.В. ГРАБОВСКИЙ, Ю.В. КОСТЕНКО, А.С. ЛЯШЕНКО, М.Р. ХУЗЯХМЕТОВА*

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИБРОУДАРНЫХ МАШИНАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

В работе получили реализацию новый подход и усовершенствованная математическая модель для обоснования параметров виброударных машин по критерию отстройки от ударного резонанса на высоких частотах. Для этого создан специализированный программно-модельный комплекс "Виброудар", отличающийся адаптацией к исследованию конструкций машин с варьируемой структурой и параметрами. Это создает потенциальные возможности для целенаправленного варьирования и тех, и других по критерию отстройки от резонансных режимов.

**Ключевые слова:** виброударная машина, динамический процесс, импульсное нагружение, спектр собственных частот колебаний, резонанс

У роботі отримали реалізацію новий підхід і вдосконалена математична модель для обґрунтування параметрів віброударних машин за критерієм відбудови від ударного резонансу на високих частотах. Для цього створено спеціалізований програмно-модельний комплекс "Віброудар", що відрізняється адаптацією до дослідження конструкцій машин з варійованою структурою і параметрами. Це створює потенційні можливості для цілеспрямованого варіювання і тих, і інших за критерієм відбудови від резонансних режимів.

**Ключові слова:** віброударна машина, динамічний процес, імпульсне навантаження, спектр власних частот коливань, резонанс

New approach and advanced mathematical model is realized for justification of vibro-impact machine parameters according to the criterion of detuning of impact resonance at high frequencies. For this purpose, the specialized software and model complex "Vibro-impact" is created. It's characterized by adaptation to research of machines constructions with a variable structure and parameters. This creates a potential for targeted variation of those and other by criteria for detuning of resonant modes. The algorithms are proposed for creation and variation of geometrical models of vibro-machines elements based on the technology of generalized parametric descriptions. The possibilities of changing of parametric models are demonstrated. The amount of variable parameters can be replenished depending on specific of designed machine. This creates a basis for organization of multiple calculations of dynamic characteristics for investigated vibro-machines taking into account potential impact resonance.

**Keywords:** vibro-impact machine, dynamic process, impulse loading, spectrum of normal mode frequencies, resonance

#### Введение

Как отмечается в [1], расчет и обоснование рациональных параметров тяжело нагруженных виброударных машин с учетом периодического ударного воздействия сдерживается тем, что существующие методики [1–11] не нацелены на учет и предотвращение возможности возникновения в элементах машины резонансных режимов. В то же время такая возможность для современных крупногабаритных тяжело нагруженных машин возрастает, поскольку режимы их работы интенсифицируются, а диктуемые ограничения на качество выполнения технологических операций и стремление снизить массу этих машин приводит к тому, что спектр собственных частот колебаний из-за упругого деформирования конструкции распространяется вниз вплоть до рабочих частот ее возбуждения. При этом важно прогнозировать возможные эксплуатационные проблемы и предотвратить их уже на этапе проектирования.

В связи с этим в работе [2] разработаны основы математического и численного моделирования динамических процессов в виброударных машинах (ВМ). Необходимо отметить, что в отличие от традиционных методов расчета параметров проектируемых машин [12], которые базируются на применении аналитических соотношений, допускающих простую алгоритмизацию и реализацию, в случае расчета виброударных машин с учетом возможности ударного резонанса на высоких (деформационных) частотах ситуация осложняется. Это вызвано, во-первых, сложностью описания основных силовых элементов этих машин, имеющих громоздкую структуру и неканонические формы. Во-вторых, решение базовой для этого случая задачи анализа (то есть определение спектра собственных частот и форм колебаний исследуемой дискретно-континуальной системы с учетом упругого деформирования сложной простран-

ственной конструкции) возможно только с применением численных методов, в частности, метода конечных элементов. В-третьих, критериальные соотношения (в первую очередь, функция качества), выражаемые через значения ряда собственных частот, также не всегда допускают в связи с этим аналитическое представление через числовые, а тем более, нечисловые параметры. Этим самым создается ситуация, когда реализация математической модели, описанной в работе [1], требует создания специализированного программно-модельного комплекса (СПМК), в котором через отдельные программные модули и специально подготовленные параметрические модели осуществляется последовательное решение задач анализа и синтеза проектируемой конструкции. Соответственно, общая задача создания эффективного инструмента численного расчета виброударных машин становится отдельным этапом исследований.

В свою очередь эта задача разбивается на подзадачи создания структуры создаваемого программно-модельного комплекса, алгоритмов и программных модулей для управления параметрами проектируемой машины, программных средств для генерирования геометрических, расчетных и численных моделей исследуемых объектов, подсистем решения задач анализа динамических характеристик исследуемой конструкции, а также целенаправленного их варьирования для улучшения функции качества. Кроме того, нужны интерфейсный и управляющий модули, интегрирующие все компоненты создаваемого программно-модельного комплекса в единую компьютерную среду. Решение описанного комплекса задач на примере ВМ составляет содержание данной работы.

© Лунев Е.А., Барчан Е.Н., Артемов И.В., Набоков А.В., Лисовол Я.Н., Грабовский А.В., Костенко Ю.В., Ляшенко А.С., Хузахметова М.Р., 2017

### Структура программно-модельного комплекса для расчета параметров виброударных машин с учетом ударного резонанса

Специализированные программно-модельные комплексы [12, 13] являются мощным инструментом проектных исследований виброударных машин. Они направлены на решение задач анализа процессов и состояний, верификации характеристик и синтеза параметров того или иного класса машин. В данном случае в число учитываемых физических явлений включен ударный резонанс, возможный в проектируемых ударных машинах. В предшествующих работах [12, 13] это явление не учитывалось. В связи с этим необходимо адаптировать структуру создаваемого специализированного программно-модельного комплекса к новому набору и типу задач. Соответственно, в структуре создаваемого СПМК "Виброудар" учтены все основные модули, а также информационные потоки и связи между ними (рис. 1).

Исходный этап исследований, соответствующий анализу чувствительности модели машины к изменению тех или иных параметров и формированию параметрического пространства, в котором будет производиться синтез виброударной машины, сконцентрирован в модуле I (см. рис. 1). В модуле II по текущему набору параметров  $p_i$  формируется геометрическая модель ВМ  $G(p_i)$  в виде набора команд  $K_G(p_i)$ , которые преобразуются в универсальном редакторе (в данном случае в SolidWorks) в конкретную виртуальную конструкцию. После этого в модуле III создается набор команд  $K_F(p_i)$ , посредством которых в универсальной САЕ-системе (в данном случае ANSYS) создается конечно-элементная модель исследуемой конструкции. Далее модуль IV производит с привлечением универсального решателя (тот же ANSYS) вычисление спектра и собственных форм текущего варианта конструкции. Далее модуль V осуществляет оценку функции качества, а модуль VI – вариативное целенаправленное изменение  $p_i$  по условию отстройки

от ударного резонанса.

Приведенная выше структура СПМК описана в общем виде. При ее реализации в каждом конкретном случае отдельные модули модифицируются, адаптируя СПМК к тому или иному объекту. Далее в работе все исследования проводятся на примере виброударной машины для выбивки крупного вагонного литья [12, 13].

### Анализ динамики многомассовых систем при импульсном нагружении

Полный анализ динамических процессов, протекающих в виброударной машине, осуществляемый, например, прямым интегрированием уравнений движения конечно-элементного ансамбля, сдерживается большими размерами конечно-элементной модели, а также необходимостью осуществления многовариантных расчетов динамических процессов. Все это лавинообразно увеличивает затраты вычислительных ресурсов и времени, необходимого для проведения цикла исследований. Между тем на начальных этапах исследований на первый план выступает оперативность, а не высокая точность проводимых расчетов. В связи с этим привлекательным вариантом становится использование упрощенных моделей исследуемой динамической системы. В то же время такая упрощенная система должна отображать основные качественные свойства и количественные характеристики исходного объекта.

Основными свойствами исследуемой системы являются: спектр и реакция отдельных собственных движений на приложение внешней нагрузки. Таким образом, построение "эквивалентной" упрощенной модели должно сопровождаться сохранением этих свойств и характеристик, присущих исходной.

С целью построения упрощенных "эквивалентных" динамических систем (УЭДС) предлагается следующий алгоритм.

1. Исходная система моделируется в виде линейной многомассовой системы (рис. 2).

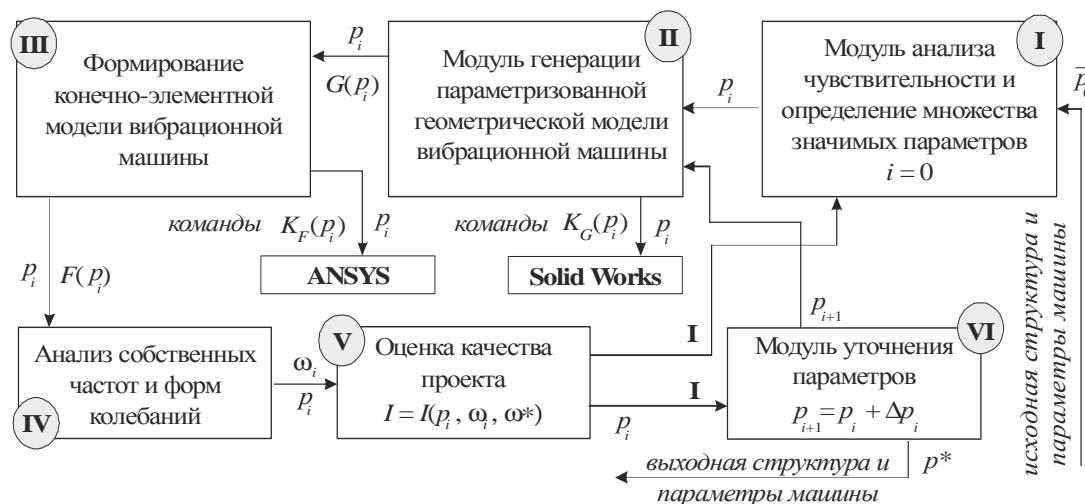


Рисунок 1 – Структура СПМК "Виброудар"

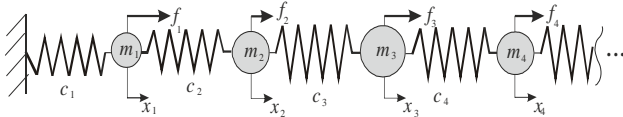


Рисунок 2 – Структура "эквивалентной" динамической системы

2. Количество элементов в создаваемой УЭДС ( $N_s$ ) подбирается из того минимально необходимого количества собственных частот и форм, которое требуется для практических целей в конкретном случае. Обычно это число можно оценить по амплитудно-частотной характеристике образца-аналога проектируемой машины, помещенной на стенд с вибровозбудителем.

3. Соотношения  $m_i$  и  $c_i$  ( $i = 1 \dots N_s$ ) подбираются таким образом, чтобы проимитировать у этой системы спектр колебаний, идентичный той части спектра исследуемого объекта, который предполагается удерживать в УЭДС (см. п. 2).

4. Проводится анализ динамических процессов в УЭДС путем интегрирования уравнений ее движения:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = f_1(t); & (1) \\ m_i \ddot{x}_i + c_i (x_i - x_{i+1}) + c_{i-1} (x_i - x_{i-1}) = f_i(t), & (2) \\ i = 2, \dots, N_s; \\ m_{N_s} \ddot{x}_{N_s} + c_{N_s} (x_{N_s} - x_{(N_s-1)}) = f_{N_s}. & (3) \end{cases}$$

Здесь  $f_k(t)$  – внешние силы, прикладываемые к отдельным массам. Кроме сил инерции и упругих восстанавливающих сил, в системе уравнений (1)-(3) в левой части можно задать также и диссипативные слагаемые, обуславливаемые вязким трением.

5. Проводится варьирование параметров  $c_i$ ,  $m_i$  в некоторых пределах. При этом контролируется спектр частот УЭДС, определяемый из уравнения

$$\begin{vmatrix} \begin{pmatrix} c_1 + c_2 - \\ -m_1 \omega^2 \end{pmatrix} & -c_2 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & \begin{pmatrix} c_2 + c_3 - \\ -m_2 \omega^2 \end{pmatrix} & -c_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & c_{(N_s)} & \dots & \begin{pmatrix} c_{N_s} - \\ -m_{N_s} \omega^2 \end{pmatrix} \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

"Миграция" спектра собственных частот должна укладываться в "миграцию" спектра собственных частот исходной системы. Для этих измененных УЭДС (вернее, с измененными характеристиками, но с постоянной структурой) проводится анализ динамических процессов в соответствии с п. 4.

6. Определяется влияние массовых и жесткостных характеристик на исследуемую УЭДС и разрабатываются рекомендации по обоснованию конструктивных параметров проектируемой ВМ.

7. Проводится анализ динамических характеристик усовершенствованной машины на ее полной конечно-элементной модели. В случае несоответствия результатов изменяется количество звеньев УЭДС  $N_s$ , и цикл исследований п.п. 2-7 повторяется.

В качестве иллюстрации проведен анализ трех-массовой системы. Первая частота системы соответствует трансляционной частоте колебаний исходной системы. Вторая – первой деформационной, третья – второй деформационной (рис. 3).

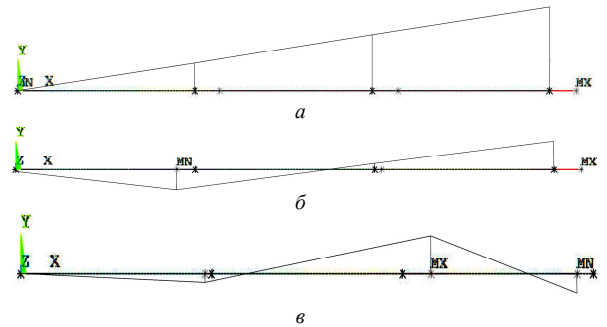


Рисунок 3 – Тестовая упрощенная "эквивалентная" динамическая система, моделирующая динамические свойства виброударной машины:

- а – 1-я частота  $\omega_1 = 2.21$  Гц;
- б – 2-я частота  $\omega_2 = 12.25$  Гц;
- в – 3-я частота  $\omega_3 = 23.75$  Гц

При этом  $m_1 = 13200$  кг,  $m_2 = 6600$  кг,  $m_3 = 6600$  кг,  $c_1 = 5.28 \cdot 10^6$  Н/м,  $c_2 = 5.28 \cdot 10^7$  Н/м,  $c_3 = 5.28 \cdot 10^7$  Н/м. Было проведено варьирование  $m_2$  и  $m_3$  в интервалах  $\pm 10\%$  от номинальных. "Осциллограммы" временных распределений перемещений  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , полученные путем интегрирования уравнений движения для базового варианта, а также для некоторых сочетаний варьируемых параметров, представлены в табл. 1, 2. Интегральные характеристики процессов сведены в табл. 3. Здесь контролируемые величины отнесены к своим номинальным значениям.

В табл. 1 приведены графики изменения положения масс 1, 2 и 3 упрощенных "эквивалентных" динамических систем при базовых параметрах. При этом частота воздействия импульсной нагрузки  $\omega_1 = 13.91908072$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 77.02122233$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_3 = 149.2447337$  с<sup>-1</sup>, промежуток времени – 18 с., 50000 расчетных точек.

В табл. 2 приведены графики изменения положения масс 1, 2 и 3 упрощенных "эквивалентных" динамических систем:

- при  $m_3 = 0,9m_2$ :  $\omega_1 = 14.11206424$  с<sup>-1</sup> (2,2 Гц) – частота воздействия импульсной загрузки,  $\omega_2 = 79.08768129$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_3 = 151.1121345$  с<sup>-1</sup>, промежуток времени – 36 с., 50000 расчетных точек;
- при  $m_3 = 1,1m_2$ :  $\omega_1 = 13.73311169$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 75.18108507$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_3 = 147.7563310$  с<sup>-1</sup>, промежуток времени – 36 с., 50000 расчетных точек;
- при  $m_2 = 0,9m_3$ :  $\omega_1 = 4.10287178$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 77.15179387$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_3 = 155.0047983$  с<sup>-1</sup>, промежуток времени – 36 с., 50000 расчетных точек;
- при  $m_2 = 1,1m_3$ :  $\omega_1 = 13.74203827$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 76.89160148$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_3 = 144.3755262$  с<sup>-1</sup>, промежуток времени – 36 с., 50000 расчетных точек.

Временные распределения  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  приведены на рис. 4–7.

Таблица 1 – Результаты расчета упрощенной "эквивалентной" системы при базовых параметрах ( $\alpha$  – относительная частота импульсной нагрузки, перемещение масс №№ 1, 2, 3)

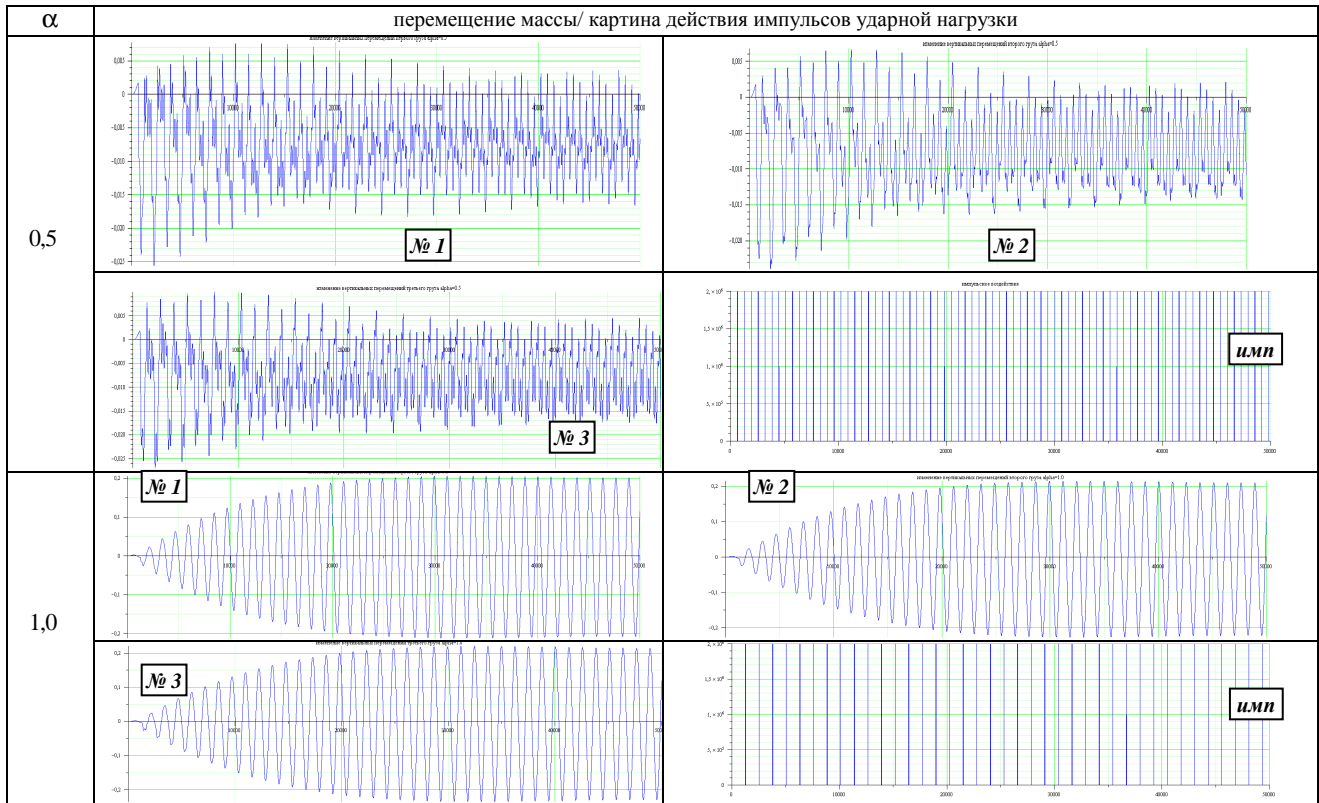


Таблица 2 – Результаты расчета упрощенной "эквивалентной" системы при базовых параметрах (перемещение масс №№ 1, 2, 3 аналогичны)

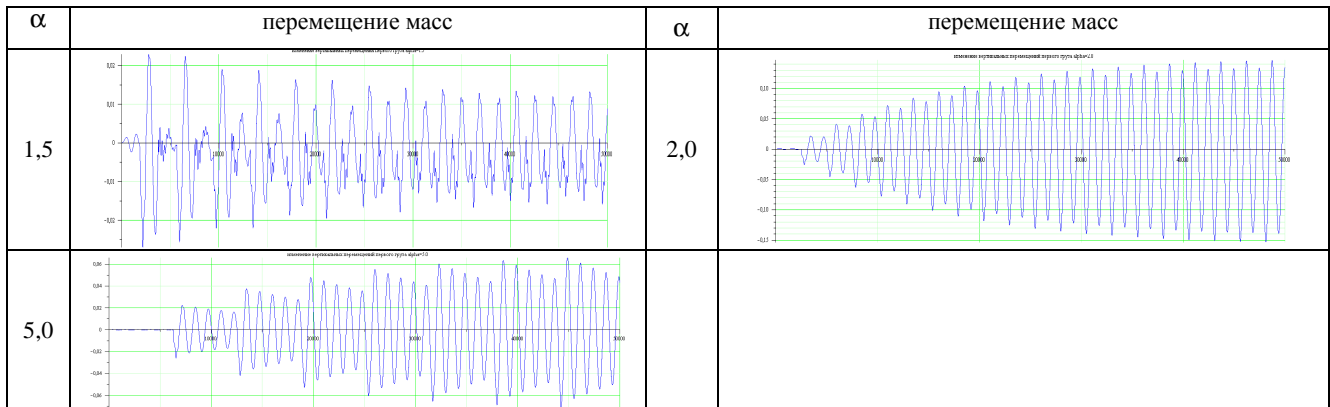
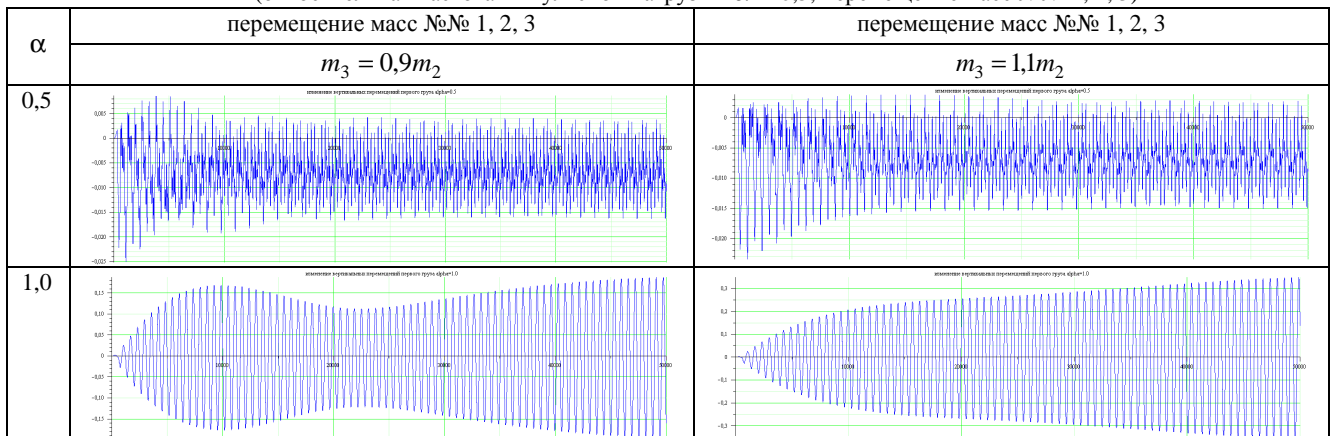


Таблица 3 – Результаты расчета упрощенной "эквивалентной" системы (относительная частота импульсной нагрузки  $\alpha = 0,5$ , перемещение масс №№ 1, 2, 3)



Окончание табл. 3

$\alpha$	перемещение масс №№ 1, 2, 3	перемещение масс №№ 1, 2, 3
	$m_3 = 0,9m_2$	$m_3 = 1,1m_2$
1,5		
2,0		
5,0		
	$m_2 = 0,9m_3$	$m_2 = 1,1m_3$
0,5		
1,0		
1,5		
2,0		
5,0		

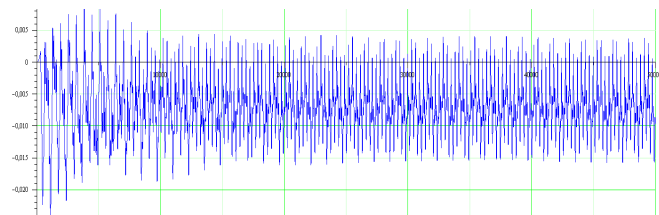


Рисунок 4 – Временные распределения  $x_1$  ( $x_2$  и  $x_3$  – аналогичные) при  $m_2 = 0,9 m_3$

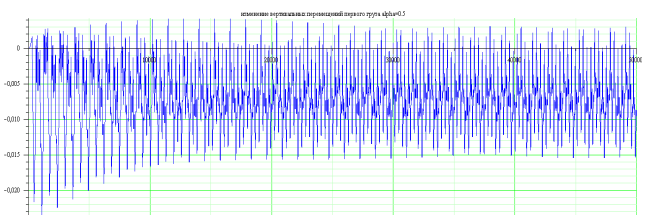


Рисунок 5 – Временные распределения  $x_1$  ( $x_2$  и  $x_3$  – аналогичные) при  $m_2 = 1,1 m_3$



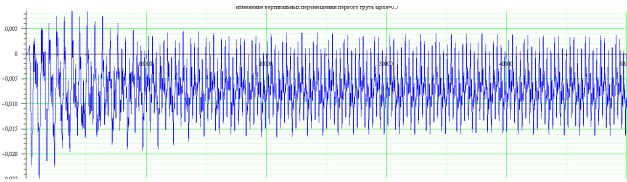


Рисунок 6 – Временные распределения  $x_1$  ( $x_2$  и  $x_3$  – аналогичные) при  $m_3 = 0,9 m_2$

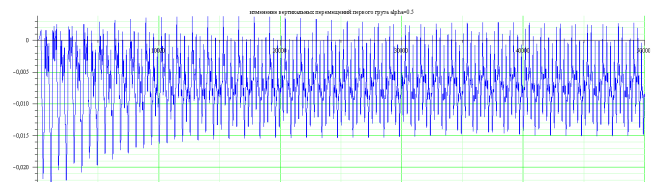


Рисунок 7 – Временные распределения  $x_1$  ( $x_2$  и  $x_3$  – аналогичные) при  $m_3 = 1,1 m_2$

Таблица 4 – Интегральные характеристики процессов

Параметры	$m_2 = 0,9 m_{2\text{номин}}$	$m_2 = 1,1 m_{2\text{номин}}$	$m_3 = 0,9 m_{3\text{номин}}$	$m_3 = 1,1 m_{3\text{номин}}$
$m_2 / m_{2\text{номин}}$	0,9	1.1	1	1
$m_3 / m_{3\text{номин}}$	1	1	0.9	1.1
$\omega_1 / \omega_2 / \omega_3 \text{ (с}^{-1}\text{)}$	14.102/77.151/155.004	13.742/76.891/144.375	14.112/79.087/151.112	13.733/75.181/147.756
$x_1 / x_{1\text{номин}}$	0.878	0.902	0.096	0.853
$x_2 / x_{2\text{номин}}$	0.937	0.95	1	0.906
$x_3 / x_{3\text{номин}}$	0.909	0.9	0.981	0.827
$\omega_1 / \omega_{1\text{номин}}$	1.013	0.987	1.014	0.986
$\omega_2 / \omega_{2\text{номин}}$	1.001	0.998	1.026	0.976
$\omega_3 / \omega_{3\text{номин}}$	1.038	0.967	1.012	0.99

Анализ полученных временных распределений  $x_1, x_2, x_3$ , а также спектра  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  УЭДС при варьировании массово-жесткостных характеристик дает основание для следующих выводов.

1. Спектр колебаний УЭДС при варьировании  $m_2, m_3$  на 10 % реагирует по-разному. Частота  $\omega_1$  изменяется слабо (до 2,5 %). Частоты  $\omega_2, \omega_3$  – сильнее (до 7 %). Таким образом, нижняя частота более консервативна, и свойства конструкции можно варьировать, практически оставляя постоянной нижнюю (для исходной системы – трансляционную) собственную частоту колебаний.

2. Характер движения трех масс при варьировании  $m_2, m_3$  изменяется незначительно, практически повторяя движение  $m_1$ . При приближении к частотам, кратным частоте возмущающей силы, наступает ударный резонанс. При изменении масс и жесткостей происходит быстрая отстройка от резонанса.

Таким образом, этого эффекта можно добиваться и в реальной конструкции за счет незначительного изменения массово-жесткостных характеристик элементов проектируемых виброударных машин.

**Параметрические модели виброударных машин как дискретно-континуальных динамических систем**

В основе функционирования создаваемого СПМК "Виброудар" лежит подход, проводящий и реализующий на конкретном классе машин метод обобщенного параметрического описания исследуемых механических систем [6]. Соответственно, при этом все операции производятся с варьируемыми, изменяемыми, управляемыми, модифицируемыми конструктивными схемами и параметрами их моделей.

В работе основное внимание сосредоточено на тяжело нагруженных технологических машинах для выбивки крупного вагонного литья [12, 13]. Соответственно требуется разработка способа параметризации элементов этих машин. Поскольку речь идет о такой трудноформируемой информации как структуры и конструктивные решения, то необходимо обратиться к опыту проектирования машин-аналогов [12, 13].

На основе анализа существующих решений в качестве базового варианта принята машина, описанная в [12]. В дополнение к известной номинальной структуре (рис. 8) предлагается рассмотреть несколько вариантов усиления боковин, щек, подрешетных балок толщин, решеток и т.д. (рис. 9). Соответствующие изменяемые модели виброударной машины представлены в табл. 5, 6 ( $p_i$  – обобщенный параметр).

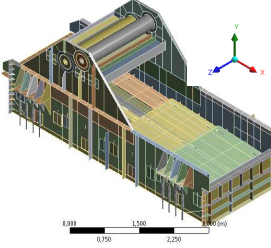
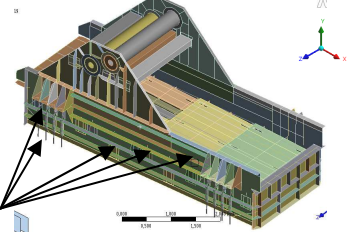
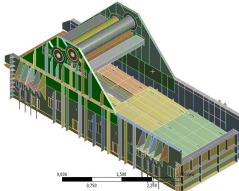
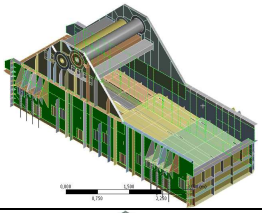
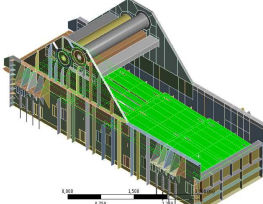
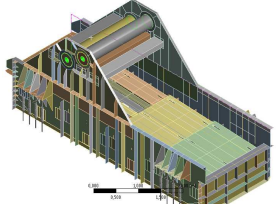


Рисунок 8 – Номинальная структура конструкции выбивной виброударной машины



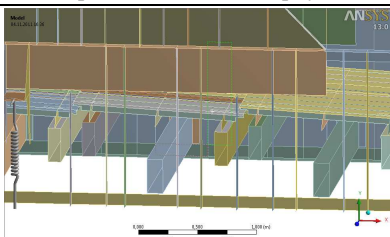
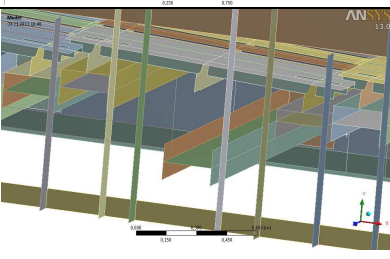
Рисунок 9 – Варианты усиления базового варианта корпуса выбивной машины

Таблица 5 – Геометрические модели корпуса вибромашины при варьировании конструктивных схем и параметров

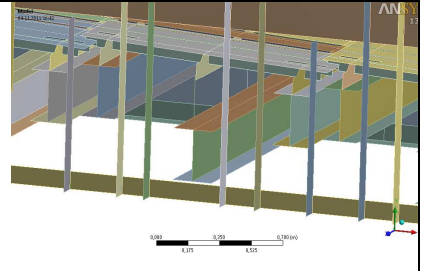
$P_1$ варьируются все толщины в модели			$P_2$ варьируется количество ребер (модель с горизонтально расположенными ребрами)	
$P_3$ варьируются схемы усиления корпуса вертикальными ребрами	2	3	4	4
	5	6		6
$P_4$ варьируются толщины щеки			$P_5$ варьируются толщины боковой стенки	
$P_6$ варьируется толщина полотна (финальная модель)			$P_7$ варьируются толщины кожуха дебалансных валов	

Видно, что разработанный механизм варьирования предоставляет возможность изменять и конструктивные схемы, и параметры, тем самым осуществляя варьирование самой исследуемой конструкции, а, значит, и ее динамических характеристик. Это свойство используется при исследовании и синтезе реальной выбивной машины.

Таблица 6 – Геометрические модели корпуса ВМ при варьировании конструктивных схем и параметров

$P_8$ варьируются толщины балки (толщины и высоты)	
$P_9$ варьируются толщины и высоты полок (модель с балками в виде двутавра, расположенными горизонтально)	

Окончание табл.6

$P_{10}$ модель с балками в виде двутавра (варьируются их параметры – толщины и высоты полок)	
--	---

**Алгоритмы обоснования параметров вибромашин по критерию отстройки от ударного резонанса**

Конечным и наиболее ценным результатом работы специализированного программно-модельного комплекса "Виброудар" являются решения задачи обоснования параметров ВМ, обеспечивающих отстройку от ударного резонанса. Для этого в работе [1] предложена формулировка оптимизационной задачи поиска максимума некоторой функции качества с учетом ограничений и системы уравнений состояния. Естественно, что и целевая функция, и ограничения, и спектральные свойства исследуемого объекта являются варьируемыми и зависят от условий работы, конструкции, свойств технологи-

ческого груза и ряда других факторов, свойственных конкретной виброударной машине. В то же время требуют апробации сами подходы и алгоритмы оптимизационных алгоритмов. В связи с этим в данной работе рассмотрена тестовая пробная задача. В качестве объекта выбрана трехмассовая система, первая из частот которой имеет фиксированное значение  $\nu_1 = 20$  Гц. В качестве варьируемой части спектра рассматриваются частоты  $\nu_2 \in [20; 40]$  Гц и  $\nu_3 \in [40; 60]$  Гц. Частота возмущающей силы  $\nu_0 = 16$  Гц. Вид функции качества

$$I = \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^3 \frac{(\nu_i - k\nu_0)^2 (6-k)}{15k^2(\nu_0)^2} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Можно рассмотреть также задачу минимизации функции  $\bar{I} = 1/I \rightarrow \min$ . Вид функций  $I, \bar{I}$  в пространстве варьируемых параметров  $\nu_2, \nu_3$  представлен на рис. 10, 11. Видно, что наиболее неблагоприятным будет сочетание спектральных характеристик при  $\nu_2 = \nu_3 = 64$  Гц. В то же время при отсутствии ограничений функция  $I$  стремится к максимуму (а  $\bar{I}$  к минимуму) при  $\nu_2 \rightarrow \infty, \nu_3 \rightarrow \infty$ . Учитывая ограничения на  $\nu_2, \nu_3$ , можно провести процедуру поиска максимума функции  $I$  (или минимума  $\bar{I}$ ) (рис. 12, 13).

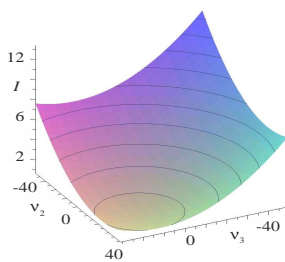


Рисунок 10 – Вид максимизируемой функции  $I$

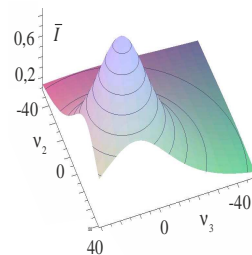


Рисунок 11 – Вид минимизируемой функции  $\bar{I}$

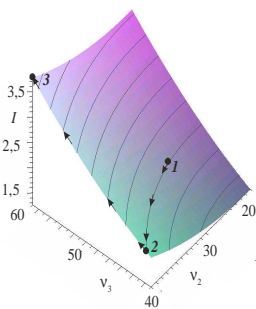


Рисунок 12 – Вид функции качества  $I$  в области  $\nu_2 \in [20; 40]$  Гц и  $\nu_3 \in [40; 60]$  Гц

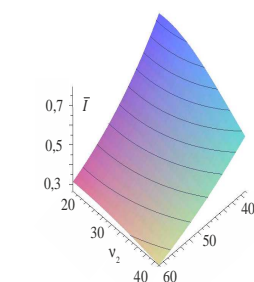


Рисунок 13 – Вид функции качества  $\bar{I}$  в области  $\nu_2 \in [20; 40]$  Гц и  $\nu_3 \in [40; 60]$  Гц

На рис. 12 представлен также алгоритм поординатного спуска, проводящий достаточно быстро (за 3 шага) к рациональному набору  $(\nu_2)^* = 40$  Гц,  $(\nu_3)^* = 60$  Гц. Здесь учитывается квадратичность минимизируемой функции  $I$  (5). Вполне естественно, что процедура максимизации привела к угловой точке ограничений сначала до ограничения

(точка 2 на рис. 12), а затем вдоль ограничения – до точки 3. При этом функция качества отстройки оказалась примерно в 3 раза лучше, чем для начального приближения.

Таким образом, структура функции качества  $I$  благоприятствует быстрому поиску оптимального решения. В то же время для реальных конструкций и применяемая функция качества, и сам характер процесса оптимизации может иметь более сложный характер. Тем не менее, на тестовом примере продемонстрирована возможность, целесообразность и действенность предлагаемых подходов к синтезу рациональных параметров исследуемых виброударных машин по критерию отстройки от ударного резонанса.

### Заключение

В работе описан новый подход к созданию СПМК для обоснования параметров виброударных машин. По представленным результатам можно сделать следующие выводы.

1. В работе получили реализацию новый подход и усовершенствованная математическая модель для обоснования параметров виброударных машин по критерию отстройки от ударного резонанса на высоких частотах. Для этого создан СПМК "Виброудар", отличающийся адаптацией к исследованию конструкций машин с варьируемой структурой и параметрами. Это создает потенциальные возможности для целенаправленного варьирования и тех, и других по критерию отстройки от резонансных режимов.

2. В работе для экспресс-анализа динамических процессов и характеристик дискретно-континуальных виброударных систем разработан алгоритм построения упрощенных "эквивалентных" динамических систем. Критерием эквивалентности служит соответствие амплитудно-частотных характеристик исходной системы и создаваемой УЭДС. На тестовых примерах продемонстрированы возможности моделирования с точки зрения оценки влияния отдельных параметров на поведение динамической системы при действии серии импульсных нагрузок. Данный подход и создаваемые УЭДС отличаются от традиционных алгоритмов повышенной оперативностью при сохранении качественных особенностей поведения исходной динамической системы, а также итерационным уточнением количественных характеристик путем сравнения результатов цикла расчетов на упрощенной модели с результатами контрольных расчетов на полной.

3. В работе предложены алгоритмы создания и варьирования геометрических моделей элементов исследуемых виброударных машин на основе технологии обобщенного параметрического описания. Продемонстрированы возможности изменения параметрических моделей. Объем варьируемых параметров при этом может пополняться в зависимости от особенностей проектируемой машины. Тем самым создается основа для организации многовариантных расчетов динамических характеристик исследуемых виброударных машин с учетом возможного ударного резонанса. Это – новые возможности, закладываемые в созданный СПМК "Виброудар" для решения задачи обоснования параметров проектируемых виброударных машин.



4. На тестовом примере проведена апробация алгоритмов поиска максимума функционала отстройки от ударного резонанса. Поиск рациональных параметров осуществляется достаточно быстро, а функция качества улучшается в несколько раз. Этим самым подтверждается возможность совершенствования параметров проектируемых ВМ.

Созданный и описанный в работе СПМК является инструментом расчетов, которые в дальнейшем будут положены в основу рекомендаций по проектированию виброударных машин.

#### Список литературы

1. Математическое и численное моделирование динамических процессов в виброударных машинах и обоснование их рациональных параметров / **И.В. Артемов, Е.Н. Барчан, Я.Н. Лисовол [и др.]** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 31(1140). – С. 3-11.
2. **Костенко Ю.В.** Аналіз параметрів динамічних процесів у віброударних машинах зі змінними масово-жорсткісними характеристиками: автореф. дисс. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.09 – "Динаміка та міцність машин" / **Костенко Ю.В.** – Харків, 2016. – 20 с.
3. **Kostenko Y.V.** Sybharmonical modes in vibroimpact system / **Y.V. Kostenko, I.V. Artemov, N.N. Tkachuk** // Research Journal of International Studies №3(22) 2014 часть 2. – Екатеринбург: ООО "Импекс", 2014. – С. 27–30.
4. **Костенко Ю.В.** Метод прямого конечного возмущения численных моделей при исследовании динамических, жесткостных и прочностных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / **А.Ю. Танченко, А.В. Литвиненко, А.Д. Чепурной, Ю.В. Костенко, Н.А. Ткачук** // Вестник БГТУ. – Брянск: БГТУ. - 2014. - № 4(44). – С.114–124.
5. **Костенко Ю.В.** Резонансы у віброударних машинах: моделі, методи, розрахунки / **М.А. Ткачук, Ю.В. Костенко, І.В. Артёмов, А.В. Грабовський** // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. - №2(74). – С.39–51.
6. **Нестеренко М.П.** Принципи раціонального конструювання стаціонарних вібраційних форм та інженерна методика їх динамічного розрахунку / **М.П. Нестеренко, Д.С. Педь** // Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництва). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Випуск 2 (32) Том 2 2012. – С.234 – 241.
7. **Нестеренко М.П.** Дослідження коливальних вібраційної установки для формування довгомірних залізобетонних виробів у режимі холостого ходу / **М.П. Нестеренко, О.П. Воскобийник, Д.С. Педь** // Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництва). – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. №1 (36) том 2 2013. – С.20–26.
8. **Нестеренко М.П.** Прогресивний розвиток вібраційних установок з просторовими коливаннями для формування залізобетонних виробів / **М.П. Нестеренко** // Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництва). – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип. № 2 (44) 2015. – С.16–23.
9. **Грабовський А.В.** Методы и алгоритмы верификации сил ударного взаимодействия в виброударных системах / **А.В. Грабовський** // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2010. – № 3/9(45). – С. 42 –46.
10. **Grabovskiy A.V.** An approach to identification of impact interaction model for a vibroimpact system / **N.N. Tkachuk, A.V. Grabovskiy, N.A. Tkachuk** // The Third Conference Nonlinear Dynamics. – Харьков: ООО "ЭДЕНА", 2010. – P. 207-212.
11. **Ольшанский В.П.** О резонансных колебаниях механизмов линейно-переменной массы / **В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский** // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. гос-ва ім. П. Василенка. – 2014. – Вип. 152. – С. 34–42.
12. **Барчан Є. М.** Удосконалення методів розрахунку та конструкції вибвної транспортуючої машини для формувальних ліній круп-

ного литва : дис. канд. техн. наук : 05.02.02 / **Барчан Євген Миколайович.** – Маріуполь. – 2008. – 178 с.

13. **Грабовський А.В.** Ударное взаимодействие и динамические процессы в виброударных машинах с частичным разрушением технологического груза: дис. кандидата техн. наук: 05.02.09 / **Грабовський Андрей Владимирович.** – Харків, 2010. – 181 с.

#### References (transliterated)

1. Matematicheskoe i chislennoe modelirovanie dinamicheskikh processov v vibroudarnykh mashinakh i obosnovanie ih racional'nykh parametrov / **I.V. Artemov, E.N. Barchan, Ja.N. Lisovol [i dr.]** // Vestnik NTU "KhPI". Seriya: Mashinovedenie i SAPR. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 31(1140). – P. 3-11.
2. **Kostenko Yu.V.** Analiz parametrov dinamichnykh protsesiv u vibroudarnykh mashynakh zi zminnyymi masovo-zhorstkisnymi kharakterystykamy : avtoref. dyss. na zdbuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.09 – "Dynamika ta mitsnist' mashyn" / **Kostenko Yu.V.** – Kharkiv, 2016. – 20 p.
3. **Kostenko Y.V.** Sybharmonical modes in vibroimpact system / **Y.V. Kostenko, I.V. Artemov, N.N. Tkachuk** // Research Journal of International Studies. Chast' 2. – Ekaterinburg: OOO "Impeks", 2014. – No 3(22). – P. 27–30.
4. **Kostenko Ju.V.** Metod prjamoogo konechnogo vozmushhenija chislennykh modelej pri issledovanii dinamicheskikh, zhestkostnykh i prochnostnykh harakteristik tonkostennykh jelementov mashino-stroitel'nykh konstrukcij / **A.Ju. Tanchenko, A.V. Litvinenko, A.D. Chepurnoj, Ju.V. Kostenko, N.A. Tkachuk** // Vestnik BGTU. – Brjansk: BGTU, 2014. – No 4(44). – P.114–124.
5. **Kostenko Yu.V.** Rezonansy u vibroudarnykh mashynakh: mode-li, metody, rozrakhunky / **M.A. Tkachuk, Yu.V. Kostenko, I.V. Art'omov, A.V. Hrabovsk'kyj** // Vjbratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. – 2014. – No 2(74). – P.39–51.
6. **Nesterenko M.P.** Pryntsypy ratsional'noho konstruyuvannya statsionarnykh vibratsiynykh form ta inzhenerna metodyka yikh dynamich-noho rozrakhunku / **M.P. Nesterenko, D.S. Ped'** // Zbiryk naukovykh prats' (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo). – Poltava: Polt-NTU, 2012. – No 2 (32). Tom 2. – 2012. – P. 234 – 241.
7. **Nesterenko M.P.** Doslidzhennya kolyvan' vibratsiyanoi usta-novky dlya formuvannya dovhomimnykh zalizobetonnnykh vyrobiv u rezhymi kholostoho khodu / **M.P. Nesterenko, O.P. Voskobiynyk, D.S. Ped'** // Zbiryk naukovykh prats' (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo). – Poltava: PoltNTU, 2013. – No 1 (36). Tom 2. – 2013. – P. 20–26.
8. **Nesterenko M.P.** Prohresyvnyy rozvytok vibratsiynykh ustanovok z prostorovymy kolyvannyamy dlya formuvannya zalizobe-tonnykh vyrobiv / **M.P. Nesterenko** // Zbiryk naukovykh prats' (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo). – Poltava: PoltNTU, 2015. – No 2 (44). – 2015. – P. 16–23.
9. **Grabovskij A.V.** Metody i algoritmy verifikacii sil udamogo vzaimodejstvija v vibroudarnykh sistemah / **A.V. Grabovskij** // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. – Kharkiv, 2010. – No 3/9(45). – P. 42 –46.
10. **Grabovskiy A.V.** An approach to identification of impact interaction model for a vibroimpact system / **N.N. Tkachuk, A.V. Grabovskiy, N.A. Tkachuk** // The Third Conference Nonlinear Dynamics. – Kharkiv: OOO "JeDENA", 2010. – P. 207-212.
11. **Ol'shanskij V.P.** O rezonansnykh kolebanijah mehaniz-mov linejno-peremennoj massy / **V.P. Ol'shanskij, S.V. Ol'shanskij** // Visnik Kharkivs'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu sil'skogo gospodarstva im. P. Vasilenka. – 2014. – No 152. – P. 34-42.
12. **Barchan Ye. M.** Udokonalennya metodiv rozrakhunku ta konstruksiyi vybvnoyi transportuyuchoyi mashyny dlya formuval'nykh liniy krupnoho lytva : dys. kand. tekhn. nauk : 05.02.02 / **Barchan Yevhen Mykolayovych.** – Mariupol'. – 2008. – 178 p.
13. **Grabovskij A.V.** Udarnoe vzaimodejstvie i dinamiche-skie processy v vibroudarnykh mashinakh s chastichnym razrusheniem tehnologicheskogo gruzha: dis. kandidata tehn. nauk: 05.02.09 / **Grabovskij Andrej Vladimirovich.** – Kharkiv, 2010. – 181 p.

Поступила (received) 19.01.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Численное моделирование динамических процессов в виброударных машинах при импульсном нагружении / **Лунев Е.А., Барчан Е.Н., Артемов И.В., Набоков А.В., Лисовол Я.Н., Грабовский А.В., Костенко Ю.В., Ля-**

шенко А.С., Хузяхметова М.Р. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2017. – № 12 (1234). – С. 55–64. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0775.

**Чисельне моделювання динамічних процесів в віброударних машинах при імпульсному навантаженні / Луньов Є.О., Барчан Є.М., Артемов І.В., Набоков А.В., Лісовол Я.М., Грабовський А.В., Костенко Ю.В., Ляшенко А.С., Хузяхметова М.Р.** // Вісник НТУ "ХПИ". Серия: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ "ХПИ", 2017. – № 12 (1234). – С. 55–64. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0775.

**Numerical simulation of dynamic processes in vibro-impact machines under impulse loading / Lunev E.A., Barchan E.N., Artemov I.V., Nabokov A.V., Lisovol Ya.N., Grabowski A.V., Kostenko, Yu.V., Lyashenko A.S., M.R. Huzyahmetova** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 12 (1234). – С. 55–64. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0775.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Луньов Євген Олександрович** – НТУ "ХПИ", здобувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Лунев Евгений Александрович** – НТУ "ХПИ", соискатель кафедри "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Lunov Eugene** – NTU "KhPI", applicant of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: +38 (057) 707-69-01

**Барчан Євген Миколайович** – кандидат технічних наук, НТУ "ХПИ", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", Харків; тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Барчан Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", кафедра "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Barhan Eugene** – candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv, tel.: +38 (057) 707-69-01

**Набоков Анатолій Володимирович** – НТУ "ХПИ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 7076901

**Набоков Анатолий Владимирович** – НТУ "ХПИ", аспірант кафедри "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 7076901

**Nabokov Anatoliy** – NTU "KhPI", post-graduate student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 7076901

**Лісовол Яна Миколаївна** – НТУ "ХПИ", аспірант, кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: ( 057 ) 707-69-01 ; e mail : [yana.lisowol@yandex.ru](mailto:yana.lisowol@yandex.ru)

**Лисовол Яна Николаевна** – НТУ "ХПИ", аспірант кафедри "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: [yana.lisowol@yandex.ru](mailto:yana.lisowol@yandex.ru).

**Lisovol Yana** – NTU "KhPI", post-graduate student of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv, tel.: +38 (057) 707-69-01; e-mail: [yana.lisowol@yandex.ru](mailto:yana.lisowol@yandex.ru)

**Грабовський Андрій Володимирович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ "ХПИ", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057)707-61-66; e-mail: [andrej8383@gmail.com](mailto:andrej8383@gmail.com).

**Грабовский Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ "ХПИ", старший научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057)707-61-66; e-mail: [andrej8383@gmail.com](mailto:andrej8383@gmail.com).

**Grabovskiy Andrey** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", Senior Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057)7076166; e-mail: [andrej8383@gmail.com](mailto:andrej8383@gmail.com)

**Костенко Юрій Вікторович** – кандидат технічних наук, НТУ "ХПИ", молодший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин"; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: [kostenko.yuriy@gmail.com](mailto:kostenko.yuriy@gmail.com).

**Костенко Юрий Викторович** – кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", младший научный сотрудник кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: (057) 707-69-01.

**Kostenko Yuriy** – candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", junior of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv, tel.: +38 (057) 707-69-01; e-mail: [kostenko.yuriy@gmail.com](mailto:kostenko.yuriy@gmail.com)

**Ляшенко Анастасія Сергіївна** – НТУ "ХПИ", студент гр. 84б кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Ляшенко Анастасия Сергеевна** – НТУ "ХПИ", студент гр. 84б кафедри "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Lyashenko Anastasiya** – NTU "KhPI", student gr. 84b of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv, tel.: +38 (057) 707-69-01

**Хузяхметова Марія Радіївна** – НТУ "ХПИ", студент гр. 84б кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Хузяхметова Мария Радиевна** – НТУ "ХПИ", студент гр. 84б кафедри "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; тел.: ( 057 ) 707-69-01

**Khuzyahmetova Mariya** – NTU "KhPI", student gr. 84b of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: +38 (057) 707-69-01